

Acúmulo de Carbono no *Pinus taeda* Estimado pela Densitometria de Raios X e Análise de Tronco

Antonio F. J. Bellote¹

Renato A. Dedecek²

Osmir José Lavoranti³

Mario Tomazello Filho⁴

Guilherme C. Andrade⁵

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento do *Pinus taeda* e, com base nas técnicas de densitometria de raios X e de análise de tronco, desenvolver modelos matemáticos para estimar a quantidade de carbono acumulada pelo lenho das árvores em função do DAP, em plantios de diferentes idades. Foram selecionados cinco plantios de *Pinus taeda*, plantados em sítios com diferentes tipos de solos, intensidade de desbaste e ritmos de crescimento. Em cada sítio foram selecionadas árvores do extrato dominante, que foram abatidas para coleta dos discos de madeira em diferentes alturas a serem submetidos a técnicas de densitometria de raios X e análise de tronco. Para a interpretação dos dados foram desenvolvidos modelos matemáticos, cujas equações foram comparadas pelo teste de identidade, igualdade estatística e validadas através da técnica de *bootstrap*. Os resultados obtidos mostraram que a produtividade do *P. taeda* é influenciada pelo solo e por práticas silviculturais; a densitometria de raios X e a análise de tronco permitem o

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor, pesquisador da *Embrapa Florestas*. email: bellote@cnpf.embrapa.br

² Engenheiro Agrônomo, Doutor, pesquisador da *Embrapa Florestas*. email: dedecek@cnpf.embrapa.br

³ Estatístico, Doutor, Técnico de Nivel Superior da *Embrapa Florestas*. osmir@cnpf.embrapa.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Doutor, Professor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP. email: mtomazel@esalq.usp.br

⁵ Engenheiro Florestal, pesquisador da *Embrapa Florestas*. email: andrade@cnpf.embrapa.br

desenvolvimento de modelos matemáticos que estimam com bastante precisão o acúmulo de carbono no lenho do *Pinus taeda*; classes de sítios assim como árvores de diferentes diâmetros geram diferentes modelos matemáticos para a estimativa do acúmulo de carbono.

Palavras-chave: Produtividade, modelos matemáticos, seqüestro de carbono, desbaste, sítios florestais.

Carbon Accumulation in *Pinus taeda* Estimated by X-rays Densitometry and Trunk Analysis

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate *Pinus taeda* growth and based on X-ray methods of densitometry and bole analyses to develop mathematical models to estimate carbon amount accumulated on trees of different ages varying on DBH. Five *P. taeda* plantations were selected on sites of different soils, thinning intensity and growing rate. On each site dominant trees were selected and discs cuts from different heights were collected and submitted to X-ray densitometry for trunk analyses. Mathematical models were developed, to generated equations to compare by testing their statistical identity and equality and to validate by bootstrap methods. The results showed that *P. taeda* productivity was influenced by soil and silvicultural practices; X-ray densitometry and trunk analyses enhanced the development of mathematical models that estimated with high precision the carbon accumulation on *P. taeda* boles; site classes as well as trees of different DBH generated different mathematical models to estimate carbon accumulation.

Keywords: Productivity, mathematical models, carbon sequestration, thinning, forestry sites.

1. INTRODUÇÃO

As árvores em crescimento naturalmente retiram o carbono (CO₂) da atmosfera,

através do processo da fotossíntese, e devolvem oxigênio. No entanto, existe um longo caminho entre a constatação desse fato e a quantificação precisa do carbono que entra no sistema através da fixação pelas plantas. É preciso conhecer como as árvores crescem acumulando biomassa e carbono; a quantidade que é incorporada ao lenho anualmente, assim como o carbono que é exportado na forma de madeira, para produção de papel, celulose, móveis etc., o qual pode ser interpretado como carbono retido e estocado na biomassa.

Os reflorestamentos com *Pinus spp.*, plantados principalmente para produção de madeira e celulose, têm um papel estratégico nesse processo, pelo fato de estarem sempre em crescimento e serem constantemente renovados, através da colheita e de novos plantios. Neste contexto, o Brasil, pela sua vocação florestal e por ser um dos maiores plantadores de florestas comerciais no mundo, pode contribuir no processo de extração de carbono da atmosfera.

A dinâmica do carbono no sistema solo, planta e atmosfera envolvem três fases distintas (SWITZER & NELSON, 1972; PRITCHETT, 1987): a 1ª, denominada geoquímica, é caracterizada pela absorção do carbono atmosférico pelas árvores; a 2ª, denominada bioquímica, refere-se à imobilização desse elemento nos tecidos vegetais, através da formação de compostos orgânicos; a 3ª fase, denominada biogeoquímica, refere-se à deposição e decomposição da serapilheira e incorporação parcial na matéria orgânica do solo, no solo ou da exportação do sistema através da madeira.

É comum na área florestal o emprego de modelos matemáticos para a determinação da biomassa produzida, (MITCHELL et al., 1981; FERREIRA, 1984; SOARES & HOSOKAWA, 1984; REIS et al. 1987; BELLOTE et al., 2005; BELLOTE & SILVA, 2000). O diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total das árvores (HT) estão altamente correlacionados, o que possibilita a obtenção de modelos ,significativos, utilizando-se apenas o DAP como variável independente nas estimativas de volume, peso do tronco, peso da copa e respectivos componentes (SOARES & HOSOKAWA, 1984; BRITO et al., 1984).

Entre as técnicas conhecidas, para a determinação da densidade específica da madeira, da espessura dos anéis de crescimento, e com isso do volume e da biomassa produzida pelas árvores, durante sua fase de desenvolvimento, a densitometria de raios X é uma ferramenta bastante útil (BELLOTE et al., 2005).

Conhecendo-se as variáveis altura e DAP, a densidade da madeira, a biomassa acumulada durante a fase de desenvolvimento das árvores e os teores de carbono presente no lenho, pode-se desenvolver modelos matemáticos, para estimar com precisão, a quantidade total de carbono presente no tronco das árvores. Estes modelos são definidos estatisticamente pelo teste de identidade e são úteis para casos em que equações de regressão são ajustadas para diferentes locais. Com isso, em dois ou mais locais, pode-se utilizar a mesma equação de regressão sem prejuízo nas estimativas. O teste pode ser utilizado, dentre outros métodos, para analisar a possibilidade de uso de equações comuns a diferentes grupos de extratos e se baseia na diferença entre a soma de quadrados de parâmetros do modelo completo e a soma de quadrados de parâmetros do modelo reduzido (GRAYBILL, 1976).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento do *Pinus taeda* e, com base na densitometria de raios X e na análise de tronco, desenvolver modelos matemáticos para estimar a quantidade de carbono acumulado na biomassa em função do DAP das árvores, em plantios de diferentes idades e crescimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados cinco plantios comerciais de *Pinus taeda*, a saber: **sítio T1**, localizado em Cambará do Sul, RS, plantado em maio de 1982, em um Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, A moderado, profundo, textura argilosa; **sítios T2 e T3** localizados no Município de Reserva, PR, plantados em junho de 1983, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura argilosa; e **sítios T4 e T5** localizados no Município de Arapoti, PR, plantados em junho de 1993 em solos classificados respectivamente como Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, A moderado, profundo, textura média e em um Cambissolo Háplico Tb Distrófico léptico, A moderado, raso e textura argilosa. As áreas selecionadas, com base no inventário florestal, apresentavam crescimentos e produtividades diferenciadas.

O plantio foi realizado em covas, sem a aplicação de fertilizantes minerais. O espaçamento entre plantas variou em função da localização do plantio e do tipo de solo onde o pínus foi plantado. Nas áreas selecionadas foram realizados desbastes e não existe registro de podas. Na Tabela 1, encontram-se resumidas as informações existentes.

Tabela 1. Espaçamentos utilizados, desbastes realizados e árvores remanescentes por hectare, durante o desenvolvimento do *Pinus taeda*, nos diferentes locais de plantio.

Sítios	Espaçamento inicial [m]	Desbastes realizados					
		Data			Árvores Remanescentes		
		1º	2º	3º	1º	2º	3º
T1	2,5 x 1,8	mai/91	mai/95	mai/00	955	470	295
T2	3 x 2	set/00	-	-	900	-	-
T3	3 x 2	jul/99	mai/03	-	900	600	-
T4	2,5 x 1,8	jan/02	-	-	650	-	-
T5	2,5 x 1,8	jan/02	-	-	650	-	-

Em cada sítio foram demarcadas parcelas experimentais e, com base no inventário florestal da parcela, selecionadas árvores dominantes representativas da população. Em cada parcela experimental foram derrubadas 4 árvores, nas quais foram realizadas medições dendrométricas e coletados discos nas seguintes posições nas árvores: base, ponteira e DAP, e à 25 %, 50 % e 75 % da altura total das árvores, para estudos de análise de tronco. Para a análise de densitometria de raios X, foram utilizados os discos de madeira do DAP.

A determinação da altura das árvores, em função da idade, foi obtida através da análise de tronco, conforme descrito por Finger (1992). A obtenção do diâmetro de cada anel de crescimento foi realizada de duas formas: a) os discos da base, da ponteira, de 25 % e 75 % da altura total foram digitalizados e as imagens obtidas foram submetidas ao programa denominado Image Tool, (WILCOX 2002), para as medições; b) nos discos do DAP, o diâmetro dos anéis foi obtido utilizando-se o programa de computador DMadeira, que trabalha com os resultados de densidade específica da madeira, obtida através da densitometria de raios X.

O volume da madeira produzido anualmente foi calculado através da equação proposta por Smalian, citado por Silva (1996). Com o volume e a densidade específica de cada anel de crescimento (a 12 % de umidade), calculou-se a quantidade de biomassa de lenho. Para a estimativa do acúmulo de carbono presente nessa biomassa, foi considerado o trabalho de Nutto et al. (2002), e

utilizado um teor médio de **C** igual a 480 mg/g de biomassa produzida.

Para a interpretação dos resultados e desenvolvimento dos modelos matemáticos, ajustaram-se equações de regressão polinomiais, cuja variável dependente foi o acúmulo de carbono no lenho (AC) e, independente, o DAP. As equações ajustadas foram comparadas pelo teste de identidade de modelo para verificar a hipótese de nulidade (H_0) e a igualdade estatística das equações. Foram testadas todas as equações ajustadas para cada relação entre o AC e DAP (DRAPPER & SMITH, 1981) e a seguir comparadas cada equação duas a duas (REGAZZI, 1992), (Tabela 2).

Tabela 2. Esquema da análise de variância para testar a hipótese de igualdade de modelos de regressão, dois a dois, com *p* parâmetros.

Fonte de Variação	g.l.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Distribuição F Central
Parâmetros (B)	P.I	$\hat{\mathbf{B}}'\mathbf{X}'\mathbf{Y} = \text{SQ1}$		
Parâmetros (?)	P	$\mathbf{?}'\sum_{i=1}^I \mathbf{X}_i'\mathbf{Y}_i = \text{SQ2}$		
Redução (H_0)	P(I-P)	$\text{SQ1} - \text{SQ2} = \text{SQ3}$	$\frac{\text{SQ3}}{P(I-P)} = \text{QM1}$	$\frac{\text{QM1}}{\text{QM2}}$
Resíduo	N-(P.I)	$\sum_{i=1}^I \mathbf{Y}_i'\mathbf{Y}_i - \sum_{i=1}^I \hat{\mathbf{B}}'\mathbf{X}_i'\mathbf{Y}_i = \text{SQ4}$	$\frac{\text{SQ4}}{N-(P.I)} = \text{QM2}$	

- B** : vetor de parâmetros de dimensão ($n_i \times 1$) no modelo *i* ($i = 1, 2, \dots, I$ modelos);
- ?** : vetor de parâmetros comuns de dimensão ($p \times 1$), $p = 1, 2, \dots, P$ parâmetros;
- X** : matriz correspondente aos valores de variável independente DAP de dimensão ($N \times P.I$), $N = 1, 2, \dots, n$ observações;
- Y** : vetor dos valores observados de dimensão ($N \times 1$).

Para a validação dos modelos foram tomadas 10⁴ amostras “bootstrap” conforme descrito em LAVORANTI, (2003) de 60 indivíduos sem reposição, para a modelagem e sobre os indivíduos restantes foram medidas a acurácia, a precisão e a robustez. A acurácia e a precisão dos modelos foram determinadas pela comparação dos dados preditos com os observados. A acurácia dos modelos foi avaliada por meio do viés médio. O viés é a diferença entre o valor predito pelo modelo e o valor observado de Incremento de Carbono Anual acumulado, (ICA). O

modelo mais acurado é aquele que possui um viés médio mais próximo do valor zero (OTT, 1993). A acurácia foi medida por:

Equação 1

$$Viés \text{ médio} = \frac{1}{10^4} \sum_{B=1}^{10^4} \left[\frac{\sum_{i=1}^{N-60} (predito_i - observado_i)}{N - 60} \right]_B$$

A robustez foi determinada pela comparação dos vieses. A precisão, ou seja, a variabilidade média da distância entre o valor predito e o valor observado foi avaliada pela raiz quadrada média do erro de predição (RQMEP) ou pelo erro residual. A RQMEP ou RMSPE ("root mean square prediction error") (BIBBY e TOUTENBURG, 1977) é uma medida de quanto as predições se ajustam aos dados observados e foi calculada por:

Equação 2

$$RQMEP = \frac{1}{10^4} \sum_{B=1}^{10^4} \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-60} (predito_i - observado_i)^2}{N - 60}} \right]_B$$

Viés médio alto indica falta de precisão, ou seja, superestimativa da RQMEP, uma vez que a distância média entre o valor predito e o observado leva também ao aumento da variabilidade entre o predito e o observado. Portanto, a precisão é mais bem avaliada quando a RQMEP é corrigida para falta de acurácia, gerando, assim, o erro residual, que é definido como o erro restante no modelo de predição, excluindo-se o erro devido ao viés médio. O erro residual é também referido como o erro de predição, excluindo-se o viés médio, e foi determinado por:

Equação 3

$$Erro \text{ residual} = \sqrt{RQMEP^2 - (viés \text{ médio})^2}$$

A robustez é a caracterização do modelo que menos é influenciada por outros fatores. Para que o modelo se enquadre nesse conceito, deve possuir, em relação às retas de regressão do viés versus variáveis, pequenos coeficientes angulares e de determinação (r^2) e, ainda, inexistência de inclinação da reta indicada por altas probabilidades estatísticas. O viés linear para o Incremento Médio de Carbono

acumulado - IMC, foi derivado regredindo-se o viés (IMC predito – IMC observado) versus IMC observado pelo PROC REG do SAS[®], (SAS INSTITUTE, 2006).

Para se comparar a precisão entre os modelos, os valores do erro residual foram submetidos ao teste de homogeneidade de variâncias (teste de Hartley), sendo comparados dois a dois, utilizando-se, para tal, o PROC TTEST do SAS[®], (SAS INSTITUTE 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Crescimento

Em relação à altura total (Tabela 3), não foram detectadas diferenças significativas entre as árvores dos sítios T1, T2 e T3, assim como entre os sítios T4 e T5. Para a variável DAP foram observadas diferenças significativas entre as árvores de todos os sítios amostrados. O volume total de madeira apresentou diferenças significativas entre todos os sítios, exceto entre as árvores dos sítios T4 e T5. Estas diferenças observadas entre o crescimento das árvores e a produção de biomassa de lenho estão diretamente relacionadas com os diferentes locais onde os plantios foram realizados e as práticas silviculturais utilizadas durante o ciclo de crescimento das árvores.

Tabela 3. Variáveis dendrométricas do crescimento em altura e diâmetro das árvores de *Pinus taeda*, plantados em diferentes sítios, aos 20 anos de idade.

Sítios	Altura total	DAP s/casca	Volume s/casca	Densidade específica (média)	Biomassa	Carbono
	[m]	[cm]	[m³]	[kg m ⁻³]	[kg árvore ⁻¹]	
T1	28,1 a	40,8 a	1,88 a	608 b	1145,2 a	549,7 a
T2	28,3 a	27,3 b	0,88 b	717 ab	630,1 b	302,5 b
T3	27,9 a	24,7 c	0,71 c	710 ab	501,2 b	240,6 b
T4	23,9 b	20,0 d	0,42 d	693 ab	292,2 c	140,2 c
T5	23,8 b	17,5 e	0,32 d	752 a	241,7 c	116,0 c

Obs: letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Para os sítios T2, T3, T4 e T5, onde foram empregadas as mesmas técnicas de plantio e realizados desbastes tardios e praticamente na mesma época, fica claro que as diferenças observadas em volume de madeira produzido estão relacionadas com as diferentes classes e tipos de solo utilizados no plantio. De acordo com Embrapa (1999), os solos dos sítios T2 e T3 são profundos, bem drenados, resistentes à erosão, susceptíveis à compactação. Para os demais sítios os solos, embora com a mesma classificação, apresentam heterogeneidade do material de origem e variam de um local para o outro. As diferenças observadas nos solos mostram: no sítio T1, o solo apresenta textura argilosa, profundo e boa drenagem; no sítio T4, textura média, profundo e boa drenagem; no sítio T5, textura argilosa, raso (rocha semi-alterada entre 30-50 cm e com baixa microporosidade), profundidade menor que 50 cm, drenagem lenta e sujeito ao encharcamento temporário.

As variações de produtividade observadas entre os sítios T1 e T4 mostram que, embora os solos apresentem propriedades físicas diferentes e que isso possa ter influenciado o crescimento do *Pinus*, a intensidade de desbastes realizados durante o ciclo foi o que mais influenciou o desenvolvimento das árvores. Isto também é válido quando comparamos a produtividade do sítio T1 com as dos demais sítios.

Para as outras variáveis apresentadas na Tabela 3, as diferenças observadas são reflexos do crescimento diferenciado das árvores. A menor densidade específica da madeira produzida pelas árvores do sítio T1 indica que, pelo fato das árvores crescerem mais em diâmetro, produzem maior quantidade de lenho primaveril durante as estações de crescimento (primavera, verão), que apresentam densidade menor (BELLÓTE et al., 2005). Árvores que crescem mais em diâmetro obviamente produzem mais biomassa e consequentemente acumulam quantidades maiores de carbono na biomassa do lenho.

3.2. Incremento anual de crescimento e carbono

As influências do solo e dos desbastes realizados podem ser visualizadas quando analisamos a produção em altura e em diâmetro das árvores, nos sítios estudados, (Gráfico 1). Com relação ao crescimento em altura distinguem-se duas condições: uma situação que engloba os sítios T1, T2 e T3 e outra que envolve os sítios T4. Nestas condições, as propriedades físicas dos sítios estudados e consequentemente os tipos de solo foram os responsáveis pelas diferenças estatísticas observadas na altura das árvores durante toda a fase de crescimento.

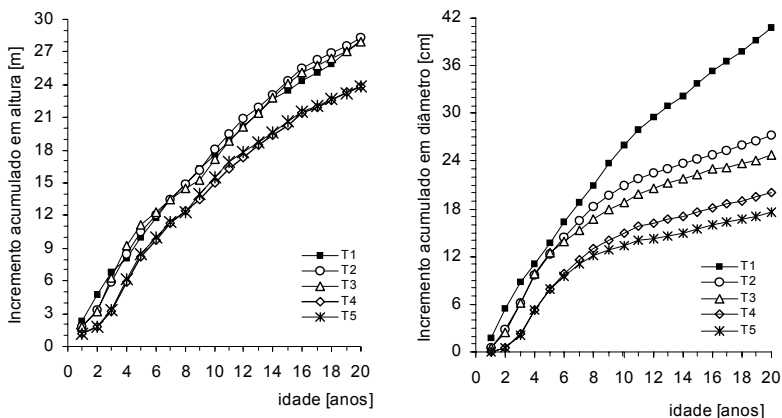


Gráfico 1. Curvas de produção em altura e diâmetro das árvores, nos diferentes locais.

Em relação à produção em diâmetro das árvores, fica claro o efeito do solo e da intensidade de desbastes realizados. O solo do sítio T1, possivelmente, apresenta condições mais propícias ao crescimento, pois até a idade de 9 anos, quando do primeiro desbaste, apresentou um acúmulo em diâmetro superior, embora não significativo, aos sítios T2 e T3. A partir do 1º desbaste, o incremento passou a ser significativo estatisticamente e aumentou até a realização dos 2º e 3º desbastes aos 13 e 18 anos, respectivamente. Entre os sítios T2 e T3, não é possível detectar a influência do desbaste, o que leva a supor que o solo destes locais podem ter ocasionado a variação do diâmetro. Possivelmente, as mesmas observações podem ser feitas quando se analisa os sítios T3 e T4.

Os resultados mostram, em relação ao acúmulo de carbono na biomassa de lenho produzido pelo *Pinus taeda* (Gráfico 2), a mesma tendência entre sítios, isto é, segue um polinômio de terceiro grau, independente do tipo de solo e do manejo silvicultural utilizado.

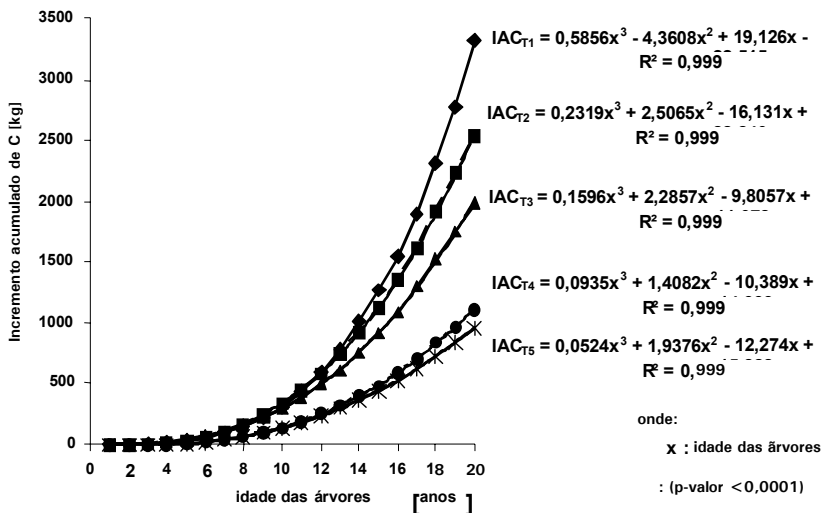


Gráfico 2. Curvas de produção de carbono no lenho do *Pinus taeda* e respectivas equações de regressão polinomiais, ajustadas para cada local de plantio.

A quantidade média de carbono observada nas árvores do sítio de maior crescimento (T1) é sempre crescente em relação ao sítio (T5). Aos 8 anos, o acúmulo foi de 2,2 vezes maior e aos 20 anos foi de 3,4 vezes maior. Considerando o acúmulo médio total, durante o ciclo de 20 anos, (Tabela 3), as árvores do sítio T1 acumularam 4,7 vezes mais carbono na biomassa do lenho do que as árvores do sítio T5.

Em função destes resultados e para estimar o acúmulo de carbono no lenho do *Pinus taeda* em função do DAP, foram inicialmente determinados os coeficientes do modelo de regressão polinomial de segunda ordem sem intercepto, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes do modelo de regressão multiplicativo - $AC = a * (DAP)^b$ - do acúmulo de carbono (AC) e diâmetro a altura do peito (DAP), para os diferentes locais.

Sítios	DAP	DAP ²	r ² Ajustado ¹	Coefficiente de Variação
T1	$5,88.10^{-4}$	3,6964	0,9891	4,52
T2	$2,92.10^{-4}$	4,2150	0,9841	6,14
T3	$4,03.10^{-4}$	4,1504	0,9824	6,09
T4	$1,38.10^{-3}$	3,8647	0,9813	7,11
T5	$1,40.10^{-3}$	3,9844	0,9838	7,24

¹ p-valor < 0.0001

Estes coeficientes mostram diferenças para as áreas estudadas, principalmente para o sítio T1 em relação aos demais sítios. Para os sítios T2 e T3, assim como para os sítios T4 e T5, houve certa similaridade entre os modelos estimados. Com esses dados, são facilmente distinguidos três grupos de modelos. O primeiro representado pelo sítio T1, o segundo onde são agrupados os sítios T2 e T3, e o terceiro, os sítios T4 e T5. O teste de identidade de modelos realizado através da matriz de redução comprova estes resultados (Tabela 5).

Tabela 5. Matriz de redução de Ho (p-valor), do teste de identidade de modelo.

Sítios	T1	T2	T3	T4
T2	<0,0001	-	-	-
T3	<0,0001	0,1969	-	-
T4	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-
T5	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,4703

O sítio T1 apresenta diferença estatística significativa com os demais sítios. Entre T2 e T3 assim como entre T4 e T5 não ocorrem diferenças. Com isso, a matriz de redução de Ho mostra existir a possibilidade de construção de três modelos matemáticos, sem perda de informação estatística (REGAZZI, 1992), sendo um exclusivo para o sítio T1, outro para os sítios T2 e T3 e outro para os sítios T4 e T5, (Gráfico 3).

Avaliando-se conjuntamente as equações polinomiais obtidas para o incremento anual de carbono e os modelos matemáticos desenvolvidos para estimar o acúmulo

de carbono em função do DAP das árvores, é facilmente comprovado que a quantidade de carbono acumulado para árvores com o mesmo diâmetro é diferente quando são comparados os diferentes locais. Isto está relacionado com o incremento médio anual em altura e diâmetro das árvores, onde se observa que, para uma mesma idade, as árvores nos diferentes sítios apresentam crescimento em diâmetro diferente, ocasionando com isso maiores incrementos em volume, em biomassa e conseqüentemente em carbono. Como existe variação no acúmulo de carbono em função do crescimento em diâmetro e altura das árvores, um modelo matemático gerado para uma determinada classe de diâmetro não pode ser utilizado para outras classes.

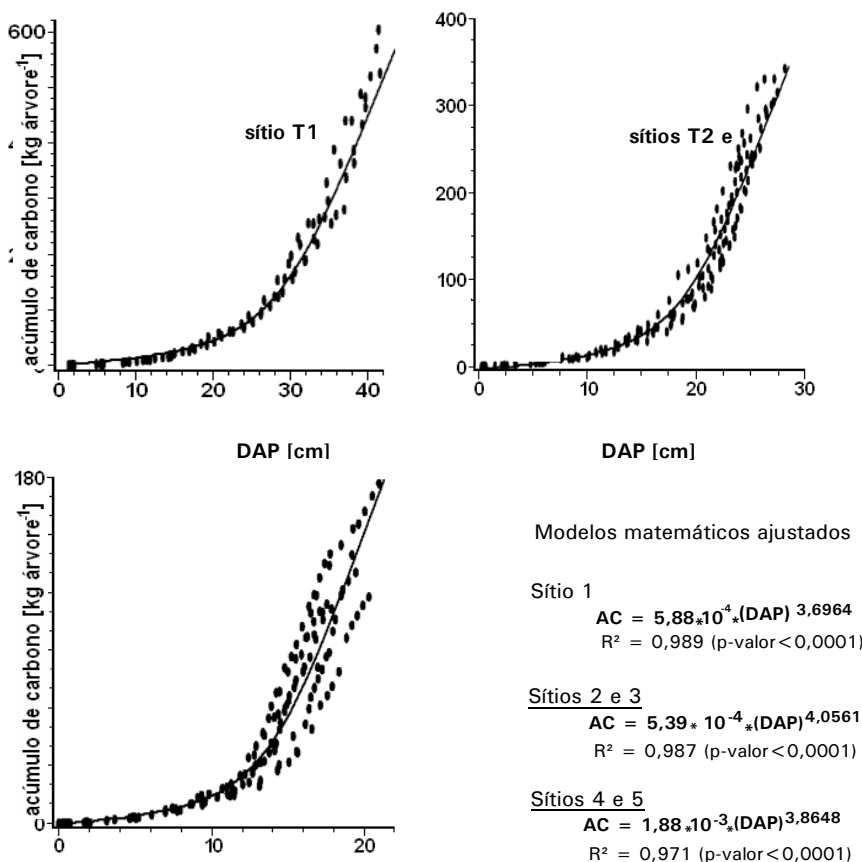


Gráfico 3. Modelagem matemática para estimar o acúmulo de carbono (AC) em função do DAP, nos diferentes sítios.

Os modelos matemáticos foram submetidos a teste de validação, através da análise de resíduos e teste de normalidade, mostrando normalidade nos resíduos e distribuição aleatória, indicando ajustamento estatístico dos dados. Assim, procedeu-se o teste de validação dos modelos associados ao sítio T1, sítios T2 e T3 e sítios T4 e T5. Os resultados destas avaliações, feitas através da técnica “bootstrap” de acurácia e precisão para os três modelos testados, estão apresentados na Tabela 6.

Observa-se que os valores preditos (viés médio) para AC no sítio T1 foram superestimados em 1,22 kg árvore⁻¹, valor este não significativo estatisticamente, quanto relacionado ao total médio da árvore para esse talhão (549,7 kg árvore⁻¹), isto é, um acréscimo de apenas 0,22 %. O modelo para os sítios T2 e T3 subestimou em 1,62 kg árvore⁻¹ de carbono, o que correspondeu a 0,59 % do total médio por árvore nestes locais. O modelo gerado para os sítios T4 e T5 subestimou em 2,27 kg árvore⁻¹ de C, o que correspondeu a 1,77 % do total médio por árvore. Esses valores mostram boa acurácia dos modelos testados.

Tabela 6. Viés médio (acurácia), erro residual (precisão), raiz quadrada média do erro de predição (RQMEP), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de determinação viés e AC observado (r^2 - viés).

Variáveis estatísticas	Sítios		
	T1	T2 e T3	T4 e T5
Valores preditos	2.10 ⁶ ,00	10 ⁶ ,00	106,00
Viés Médio [kg árvore ⁻¹]	1,22	-1,62	-2,27
Erro residual	4,22	5,19	6,92
RQMEP	4,05	4,93	6,54
R ²	0,982	0,958	0,926
R ² - viés (p-valor)	0,008 (0,9071)	0,013 (0,8237)	0,027 (0,7650)

Com relação à precisão, nota-se que os erros residuais observados nos três modelos testados foram relativamente baixos, se comparados à média do AC por árvore, podendo-se afirmar estatisticamente que os modelos estimados para os locais estudados, além de acurados e precisos, mostraram-se bem ajustados aos dados. Além disso, na análise da regressão do viés (AC predito – AC observado) versus AC observado, nota-se que os modelos não foram lineares (p-valor < 0,05). Isso, reforçado pelos baixos coeficientes de determinação do viés observados, caracteriza os modelos como robustos.

Estes resultados validam os três modelos gerados e permitem que se possa utilizá-los como ferramenta estatística para estimar com precisão o acúmulo de carbono no lenho do *Pinus taeda*, baseando-se apenas no inventário do DAP das árvores. Estes modelos podem ser utilizados com segurança estatística, para árvores dominantes em sítios com o mesmo ritmo de crescimento, e para qualquer idade das árvores entre 1 e 20 anos. Entretanto, não podem ser utilizados para estimar a quantidade de carbono acumulada em uma população de árvores. Para estas avaliações, torna-se necessário que se proceda à estratificação dessas populações por classe de diâmetro e, para cada uma delas, gerar um modelo.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem, para as condições do estudo, as seguintes conclusões:

- 1) A produtividade do *Pinus taeda* é diretamente influenciada pelas propriedades físicas do solo e pelo desbastes;
- 2) A densitometria de raios X e a análise de tronco são ferramentas adequadas para serem utilizadas no desenvolvimento de modelos matemáticos para estimar o acúmulo de carbono no tronco de *Pinus taeda*;
- 3) A quantificação do acúmulo de carbono em *Pinus taeda* pode ser estimada com precisão por modelos matemáticos;
- 4) Não é possível estabelecer apenas um modelo matemático para estimar o acúmulo de carbono no lenho do *Pinus taeda*;
- 5) Classes de sítios e árvores de diferentes diâmetros geram modelos diferentes de estimativa de acúmulo de carbono.

5. REFERÊNCIAS

BELLOTE, A. F. J.; TOMAZELLO, M.; DEDECEK, R.A. **Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda***. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 94 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 121).

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. da. Nutrição e crescimento de plantações de eucaliptos. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 105-133.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D.; GAVA, J. L.; MENEGOL, O. Nutrient export by clear cutting of *Eucalyptus grandis* of different ages on two sites, in São Paulo, Brazil. In: KOBAYASHI, S.; TURNBULL, J. W.; TOMA, T.; MORI, T.; MAJID, N. M. N. A. (Ed.). **Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: workshop proceedings**, 2-4 November 1999, Bogor, Indonesia. Bogor: CIFOR, 2001. p. 173-177.

BIBBY, J.; TOUTENBURG, H. **Prediction and improved estimation in linear models**. London: J. Wiley, 1977. 188 p.

BRITO, J. O. de; BARRICHELO, L. E. G.; COUTO, H. T. Z. do; MENDES, C. J.; REZENDE, G. C. de. Estudo do comportamento de madeiras de *Eucalyptus* frente ao processo de destilação seca. **Brasil Florestal: Boletim Técnico**, Brasília, DF, n. 8, p. 5-36, ago. 1984.

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Willey, 1981. 709 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FERREIRA, M. das G. M. **An analysis of the future productivity of *Eucalyptus grandis* plantations in the "Cerrado" region in Brazil: a nutrient cycling approach**. 1984. 230 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Faculty of Forestry, University of British Columbia, Columbia.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1992. 269 p.

GRAYBILL, F. A. **Theory and application of the linear model**. North Scituate: Duxbury Press, 1976. 704 p.

LAVORANTI, O. J. **Estabilidade e adaptabilidade fenotípica através da reamostragem "bootstrap" no modelo AMMI**. 2003. 166 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2003.

MITCHELL, C. P.; PROE, M. F.; MACBRAYNE, U. K. Biomass tables for young conifer stands in Britain. In: YOUNG, H. E. (Ed.). **Kyoto biomass studies**. Orono: University of Maine, School of Forest Resources, Complete Tree Institute, 1981. p. 45-50.

NUTTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; GRAMMEL, R.; FENNER, P. T. O mercado internacional de CO₂: o impacto das florestas naturais e das plantações. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Ed. dos Autores, 2002. p. 89-108.

OTT, R. L. **An introduction to statistical methods and data analysis**. 4th. ed. Wadsworth: Duxbury Press, 1993. 1051 p.

PRITCHETT, W. L.; FISHER, R. F. **Properties and management of forest soils**. 2nd. ed. New York: J. Willey, 1987. 494 p.

REGAZZI, A. J. Identity test for regression models and equality of parameters in orthogonal polynomial models. **Biometric Bulletin**, v. 9, n. 2, p. 6-22, 1992.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F.; KIMMINS, J. P. Acúmulo de nutrientes em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis*, plantado no Cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 11, p. 1-15, 1987.

SAS INSTITUTE. **SAS base 9.1.3 proceders**. 2. ed. São Paulo: SAS Brasil, 2006. v. 1- 4, 1934 p.

SILVA, H. D. da. **Modelos matemáticos para a estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis*, de diferentes idades**. 1996. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SOARES, R. V.; HOSOKAWA, R. T. Estimativa da biomassa energética de árvores de bracinga. **Brasil Florestal**: Boletim Técnico, Brasília, n. 8, p. 37-48, ago.1984.

SWITZER, G. L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in Loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. **Soil Science Society of America Proceeding**, v. 36, p. 143-147, 1972.

SWITZER, G. L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in Loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. **Soil Science Society of America Proceeding**, v. 36, p. 143-147, 1972.

WILCOX, D.; DOVE, B.; McDAVID, D.; GREER, D. **Image tool for Windows, version 3.0**. San Antonio: The University of Texas, Health Science Center, 2002.